

杭水制内外の流れと魚の挙動

HYDRAULIC FUNCTIONS OF THE PILE DIKE AND ITS IMPACT ON FISH BEHAVIOR IN THE VICINITY

高水克哉¹・栗原朋之²・青木宗之³・内山文哉⁴・福井吉孝⁵

Katsuya TAKAMIZU, Tomoyuki KURIHARA, Muneyuki AOKI, Fumiya UCHIYAMA and Yoshitaka FUKUI

¹正会員 工修 株式会社 東京建設コンサルタント (〒170-0004 東京都豊島区北大塚1丁目15番6号)

²学生員 東洋大学大学院 工学研究科環境デザイン専攻 (〒350-8585 埼玉県川越市鯨井2100)

³学生員 工修 東洋大学大学院 工学研究科環境デザイン専攻 (〒350-8585 埼玉県川越市鯨井2100)

⁴非会員 東洋大学 工学部環境建設学科 (〒350-8585 埼玉県川越市鯨井2100)

⁵正会員 工博 東洋大学教授 工学部環境建設学科 (〒350-8585 埼玉県川越市鯨井2100)

This research consists of three parts. First is the study about the flow influenced by the pile dike in the river. Second is an examination of whether regions in pile dikes are suitable as a habitat for fish. Third is a numerical analysis concerning the relationship between the flow and the behavior of fish.

To complete the first part, velocity of flow and water depth in an open channel is measured. In the second part, fresh water fish (*Tribolodon hakonensis*) are released into the flow and their behavior is observed by video camera. Finally, the two-dimensional shallow water equation is used to examine the profile of the flow. The random walk method is adopted to examine the behavior of fish in the flow.

The flow and the behavior of fish in the channel become clear through our experiment and numerical analysis.

Key Words : pile dike, fish habitat, numerical analysis, random walk, *Tribolodon hakonensis*

1. はじめに

河川法の改正以来，自然環境の保全，再生や良好な景観の構築といったような，魚類や小動物などの生息にやさしい河川環境の整備が活発になっている．一方，伐採等によって生じた木材をいかに有効利用するかも重要なことである．その一つの方法として，間伐材¹⁾を用いた杭水制が挙げられる．水制は，古くから伝わる伝統的工法であり，流速低減や水刳，流路固定，導流といったような機能を持っている²⁾．木を用いることは河川景観に対して良好であり，同時に河川中に生息する様々な生物，主に魚類の生息に有効であるのではないかと考えられる．そこで本研究では，特に河川中流部を想定し，杭水制の持つ流速低減機能，水刳機能を種々の杭の配置で検証すること．そして，杭水制群が魚の生息に対して有効であるということを確認するために実験と数値解析を行った．数値解析では杭の存在と魚の挙動の因果関係を明らかにする方法としてランダムウォークモデルを提唱した．

2. 間伐材を用いた杭水制実施例



(a) 杭水制観測箇所 (○印)



(b) 杭水制拡大図

図-1 砂鉄川 (岩手県，北上川水系)

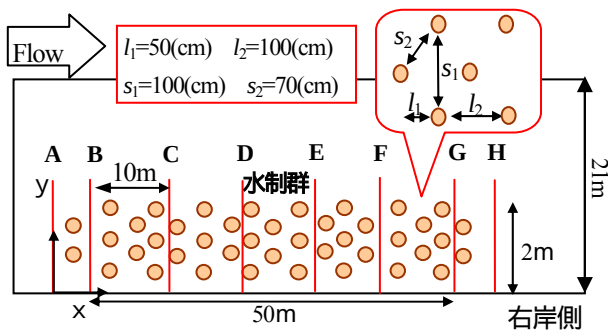


図-2 杭水制の配列(砂鉄川)

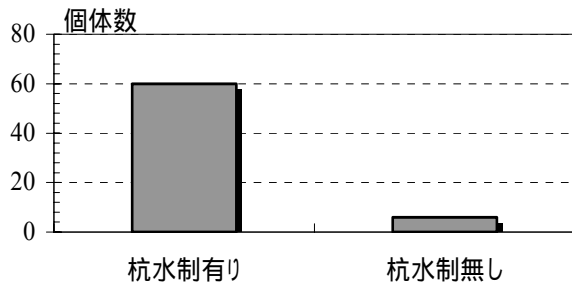


図-3 魚の生息数(砂鉄川)³⁾

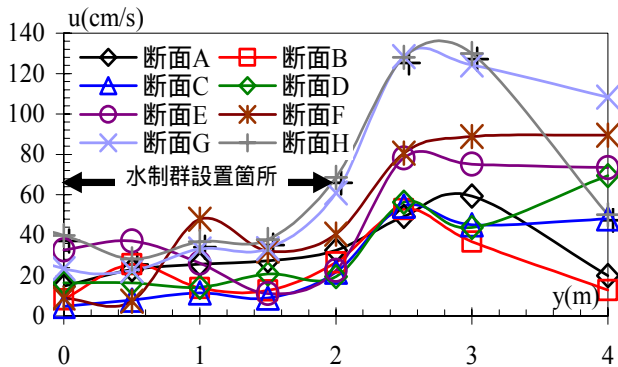


図-4 各断面における流速(水面下20cm)

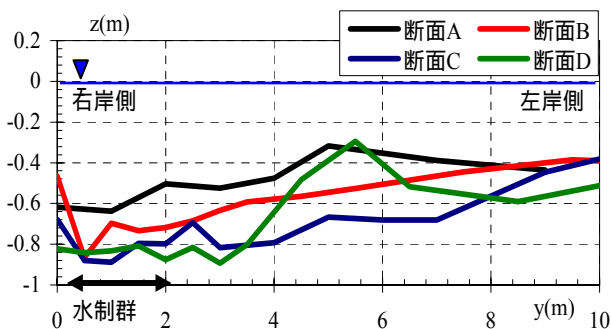
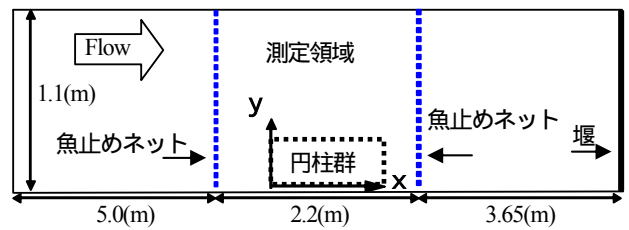
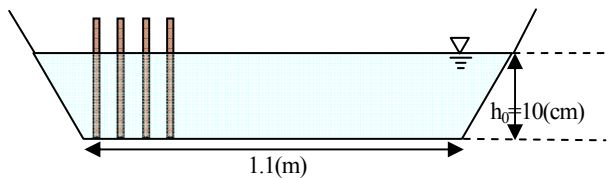


図-5 横断方向河床形状(杭水制設置箇所)

北上川の左支川の砂鉄川の北上川との合流前約1.0(km)門崎地先に、直径15(cm)の間伐材(松)を千鳥状に並べた杭水制が平成17年に設置されて現在に至っている(図-1,2)。岩手河川国道事務所一関出張所の調査によると、杭水制が、設置された区間とされなかった区間の比較から魚の生息場として適していることが判る³⁾(図-3)。なお、魚種はウグイ、アユ、アブラハヤが多かった。また、福井らの現地調査の結果、杭水制が流速を低減させる機能を発揮していることも判った(図-4)。



(a) 水路平面図



(b) 水路断面図

図-6 実験水路図

表-1 実験ケース一覧

	円柱 本数 (本)	横断方向 設置間隔 s (cm)	縦断方向 設置間隔 l (cm)	密度度 λ	透過係数 K (m/s)
Run 1	0	-	-	-	-
Run 2	275	2	4	17.188	2.068
Run 3	150	4	4	4.688	2.800
Run 4	143	2	10	3.575	2.868
Run 5	78	4	10	0.975	3.883
Run 6	77	2	20	0.963	3.908
Run 7	42	4	20	0.263	5.292
Run 8	44	2	40	0.275	5.170
Run 9	24	4	40	0.075	7.000

しかしその一方、水制内先端近傍に主流部が形成され、流下につれて洗掘が生じていることも判った(図-5)。なお、杭水制が設置されている区間の川幅は約21(m)、勾配は1/500であり、流量は4.0(m³/s)であった。

3. 模型実験

実験に使用した水路を図-6に示す。水路は幅1.1(m)、長さ10.85(m)、水路の側壁は45°の台形断面開水路である。測定領域は1.1×2.2(m)、流量 $Q=35.0$ (l/s)とした。また、実験時の平均水深を魚の遊泳に必要な10(cm)とした。

表-1に実験ケースの一覧を示す。擬似杭水制として用いた円柱は、高さ15(cm)、直径 $d=0.5$ (cm)の木製円柱であり、水路右側岸部に配置した。設置間隔は横断方向 $s=2.0, 4.0$ (cm)、そして縦断方向 $l=4.0, 10.0, 20.0, 40.0$ (cm)で6列12列である。実際の河川の杭水制は、直径 $d=12\sim15$ (cm)、 s, l は0.5(m)~1.0(m)が多く、本実験で採用した d, s, l は、水理模型実験に対して推奨されている縮尺模型1/10~1/30⁴⁾に殆んどが対応している。一方魚の動きを詳細に検討するために実魚を使っているため、魚の

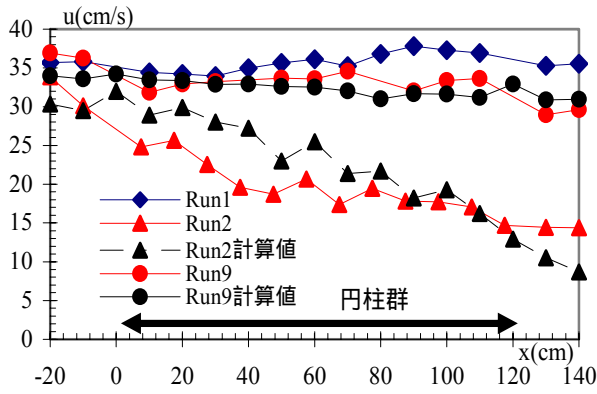


図-7 円柱群内部の流速変化 (y=15cm)

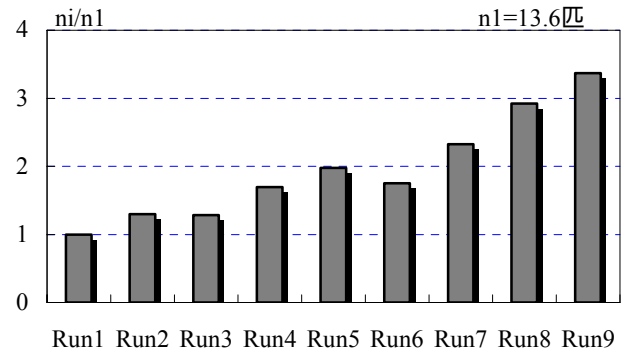
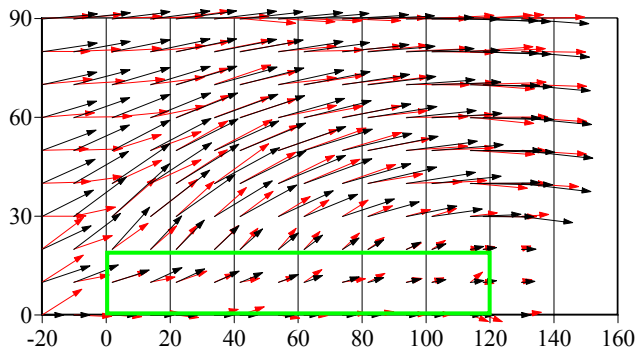
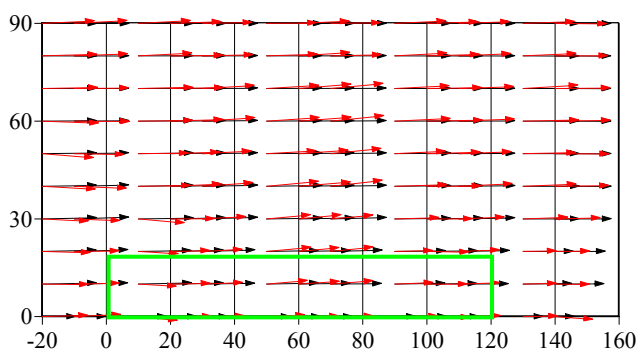


図-9 円柱群内に入ったウグイの数



(a) Run2



(b) Run9

→ 20cm/s 実測値 → 計算値 → 円柱群

図-8 uvベクトル (Run9)

動き易さを考慮して $l = 20.0, 40.0(\text{cm})$ のケースでも実験を行った。

(1) 水理実験

a) 流速低減

図-7 は円柱群内を流下するにつれての流速変化を示している。円柱群が流れに作用し、流速を減少させる働きをしており、密な配列、粗な配列共に水制の役割を果たしているといえる。

b) 水制

図-8(a), (b) に $y=0-90(\text{cm})$ までの uv ベクトルの実測値と計算値を示す。Run2 は、円柱群密度が大なため、偏流

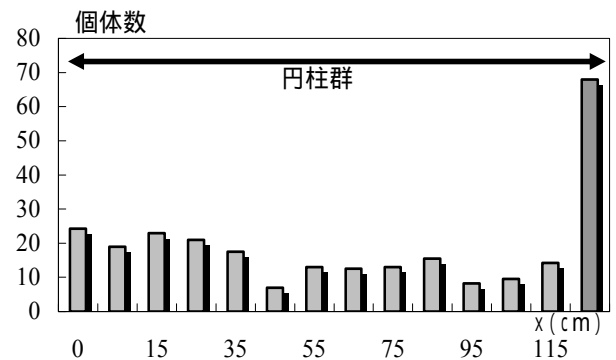


図-10 円柱群内への進入箇所と個体数 (Run9)

の規模は大きい。一方、Run9 は間隔が大いので流線の曲がりや殆んどない。

(2) 魚の挙動実験

実魚を用いた模型実験は、構造物や流れの縮尺と、魚の縮尺をどうかね合わせるかという問題を内包している。したがって何を実験魚として用いるかは、大きな問題である。海洋関係では、実際の魚が大きくそのままのものを使えないのでコイやメダカなどで行っているが⁵⁾、本実験では日本全国の、河川の中流部の、極めて汚濁の進んだ河川を除き、ほとんどの水域に棲んでいるウグイを実験魚として選んだ。実際魚は魚種やサイズによって水質、照度、水温や河岸の植生などの影響を受けて異なる動きをすることなども知られているが、流速が大きな支配要素であると考えて、ウグイの巡航速度(体長の2~4倍の数値の流速)⁶⁾のもとで実験を行った。

実験では、まず円柱群より下流側に 20 匹(体長は、6~10(cm))を放流し、流れに馴れさせてから撮影を開始した⁷⁾。観察領域(水路中流の $1.1\text{m} \times 2.2\text{m}$)⁸⁾ における魚の挙動を、ビデオカメラで 30 分間撮影した。その時の照度は、200~250(lx)⁹⁾とした。

a) 魚の挙動結果

円柱群に入ったりしたウグイの数(n_i)を図-9 に示す。図は、円柱群の無い Run1 の時に、円柱群の領域内にいた数(n_1)を基準にして比較している。結果、砂鉄川の水制と同様に円柱群内に入る数が多いことが判る。今回 Run9

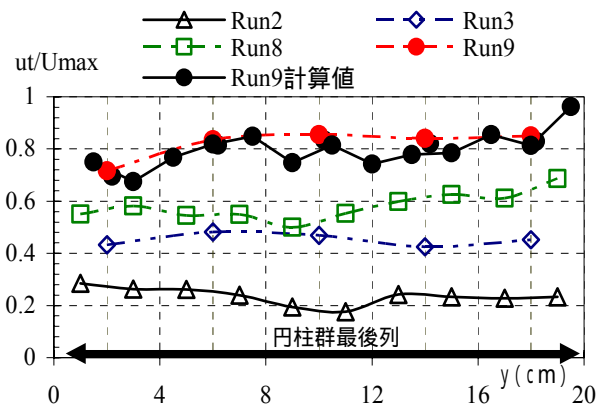


図-11 円柱群最後列の横断方向流速変化

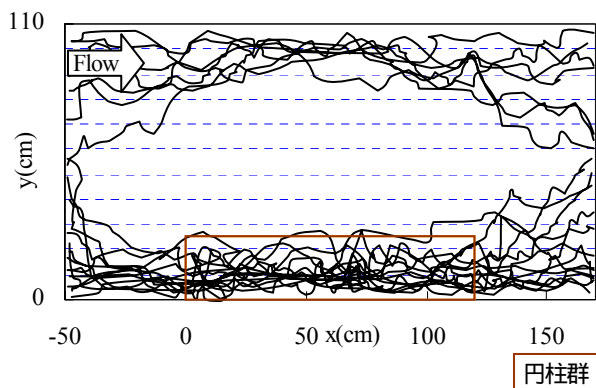


図-12 遊泳軌跡 (Run9)

で円柱群内への進入が多いことが確認できた。次に、ウグイがどこから円柱群に進入したかを Run9 について検討する。ウグイの円柱群内に進入した箇所と個体数を図-10 に示す。

円柱群の先端部から流れを横切っての進入を見ると、進入した数は流下方向に顕著な差はみられないが、円柱群最後列からの進入が最も多いことが判った。図-11 は、円柱群最後列の横断方向の流速分布であり、表示されている値は、円柱群最後列の円柱近傍の流速(u_t)と各ケースの横断面の最大流速(U_{max})との比で表している。他のケースと比べ、Run9 で円柱群最後列での流速が大きいことが判る。このことから、ウグイは円柱群最後列からの速い噴流状の流れに対して、走流性（流れに逆らって泳ぐ習性）を発揮し、円柱群最後尾から進入したと考えられる。魚の遡上軌跡図を図-12 に示す。ウグイは遡上する際、側壁、円柱群内部を好んで移動することが確認できた。

4. 数値解析

水制がある場の魚の動きを数値解析により求める。

(1) 二次元浅水方程式による流れの解析

水深、および流速は、二次元浅水方程式と連続式を用いて求める。

< x方向の運動方程式 >

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial uM}{\partial x} + \frac{\partial vM}{\partial y} \\ = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{gn^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^3} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon \frac{\partial M}{\partial x} \right) \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon \frac{\partial M}{\partial y} \right) - \frac{g}{K^2} M \sqrt{u^2 + v^2} \end{aligned} \quad (1)$$

< y方向の運動方程式 >

$$\begin{aligned} \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial uN}{\partial x} + \frac{\partial vN}{\partial y} \\ = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{gn^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^3} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon \frac{\partial N}{\partial x} \right) \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon \frac{\partial N}{\partial y} \right) - \frac{g}{K^2} N \sqrt{u^2 + v^2} \end{aligned} \quad (2)$$

< 連続式 >

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

ここに、 u, v : x方向, y方向の平均流速, M, N : x方向, y方向の流量フラックス, h : 水深, H : 水位, ε : 渦動粘性係数である。(1), (2)式中の K は透過係数であり

$$K = \frac{1}{\sqrt{C_D a_w / 2g}} \quad (4)$$

で表わされる。ここに C_D : 抵抗係数であり, a_w : 単位体積の流体塊中にある円柱群の投影面積であり、次式により与えている。

$$a_w = \frac{T \cdot a_0}{A \cdot h} \quad (5)$$

ここに、 T : 円柱本数, a_0 : 円柱1本あたりの総投影面積, A : 円柱群設置面積である¹⁰⁾。

(1), (2), (3)式より求められた u, v の値が、魚の挙動を表わす式(8)を計算するときに用いられる。

計算結果は図-8 に示されているが、杭間隔が狭いとき再現性が落ちるものの概ね流れを再現できている。

(2) 魚の挙動解析

魚はランダムに遊泳、移動すると考える。線形合同法により得られる乱数列 $Z=(z_0, \dots, z_n)$ は

$$z_n = az_{n-1} + c \pmod{M} \quad n \geq 1 \quad (6)$$

によって生成される。計算の際は、先ず初期値 z_0 を $\text{srand}()$ 関数を用いて求め、順次 $z_1 \sim z_n$ が求まる。ここで M は、最長周期を表し、 a は $0 < a < M$, c は、 $0 \leq c < M$ の定数とする。生成された乱数 z_n に 2π をかけることで、流水中での仮想魚の移動方向角度 θ_n を $0 \sim 2\pi$ の範囲で得る(式(7))。 θ_n は移動方向と X 座標とのなす角度とする。単位時間 Δt 後の仮想魚のいる地点は、次式より求める。

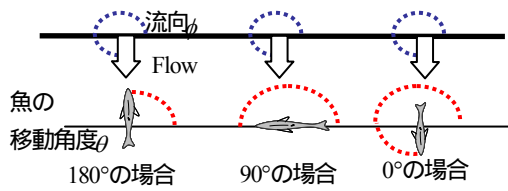


図-13 走流性を表わす係数： α

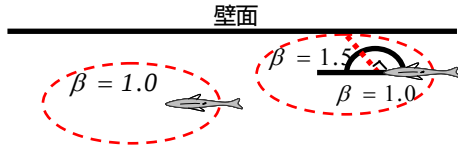


図-14 壁に対する反応を表わす係数： β

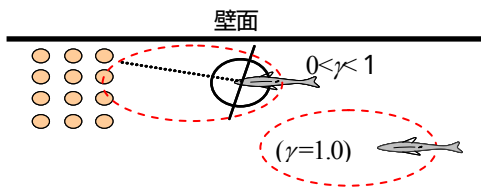


図-15 構造物に対する反応を表わす係数： γ

$$\theta_n = 2\pi z_n \quad (7)$$

$$\begin{cases} X_n = \alpha \cdot \beta \cdot \gamma \cdot \Delta t (U_m - U) \cos \theta_n + X_{n-1} \\ Y_n = \alpha \cdot \beta \cdot \gamma \cdot \Delta t (U_m - U) \sin \theta_n + Y_{n-1} \end{cases} \quad (8)$$

ここに X_n, Y_n ：現在魚がいる地点の各座標， X_{n-1}, Y_{n-1} ：前時刻の各座標， U_m ：遊泳速度，ここでは45(cm/s)を採用した⁶⁾． $U = \sqrt{u^2 + v^2}$ ：その場の流速である．走流性を表す係数 α ，壁に対する反応を表わす係数 β ，構造物に対する反応を表わす係数 γ の値を(8)式へ代入することで， X_n, Y_n を得ることができる．

(3) 係数 (α, β, γ) について

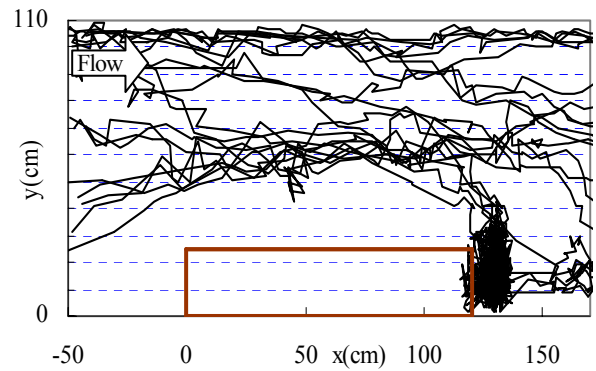
a) 走流性を表わす係数 α

α は走流性を表わす係数であるが，ウグイ，アユなどは走流性を持つことは広く知られており，我々も確認している^{7,11)}．走流性の概要を図-13に示す．流向 ϕ に対して魚の移動方向角度 θ が180°の時，最も移動速度が速いとし，走流性を表現する(式(9))．

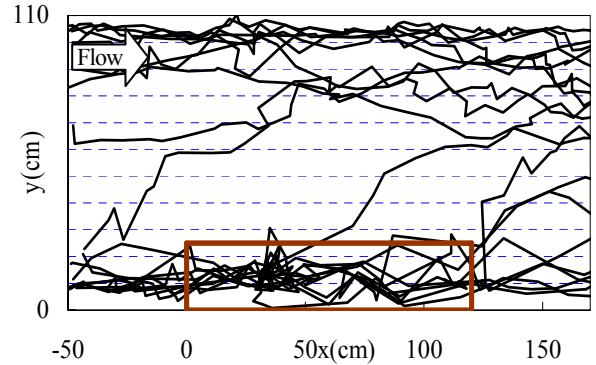
$$\left. \begin{aligned} |\phi - \theta| \leq 180 \text{ のとき} \quad \alpha &= \frac{|\phi - \theta|}{180} \\ |\phi - \theta| > 180 \text{ のとき} \quad \alpha &= \frac{360 - |\phi - \theta|}{180} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

b) 壁に対する反応を表わす係数 β ⁷⁾

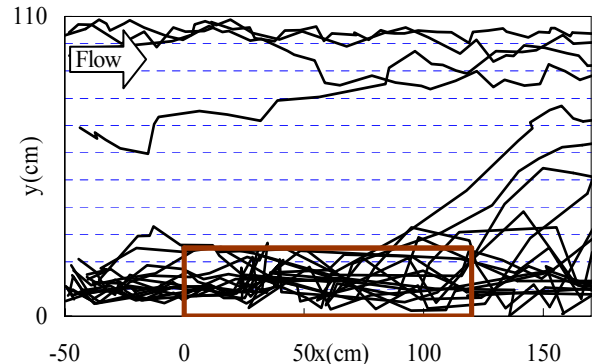
β は壁に対する反応を表わす係数である．魚が壁を認知した場合に1.5を入れる．これにより側壁に早く到達し，その結果，側壁選好が表現できる(図-14)． $\alpha \cdot \beta$ については，既に魚の挙動実験より妥当な値を得ており，



(a) $\gamma=0.1$



(b) $\gamma=0.5$



(c) $\gamma=0.9$

図-16 挙動軌跡図 (Run9)

円柱群

その値を解析に取り入れている¹¹⁾．

c) 構造物に対する反応を表わす係数 γ について

水中の構造物に対する好き嫌いを表わす係数 γ について検討を行う．係数 γ は，視界範囲内に円柱群がある場合，それに対して $0 < \gamma < 1.0$ の範囲内で(8)式に与える(図-15)．図-16(a), (b), (c)は γ の値を変化させた場合の解析結果である．

γ の値が0に近い場合，移動距離が減少し円柱群内へ進入しにくくなる．一方 $\gamma=0.9$ においては，70%位が進入している． γ の値と進入する匹数の関係が図-17である．実験と比較すると $\gamma=0.75$ が最適な値とみなせる．

(4) 初期値 z_0 の問題点

(6)式を用いて z_n を順次計算していくのであるが，初期値 z_0 をどう定めるのが1つの問題である．図-17に初

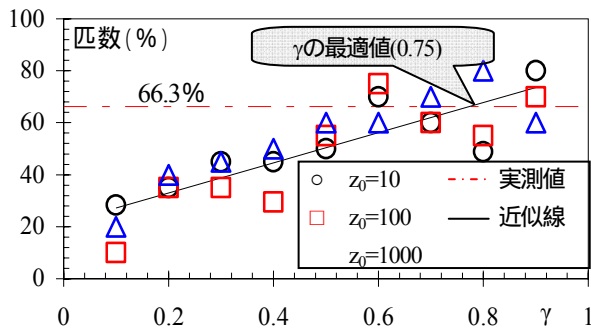
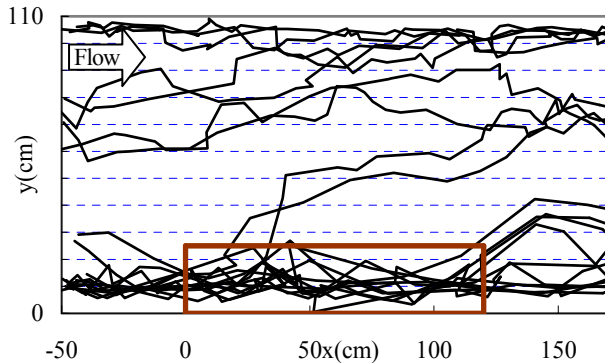
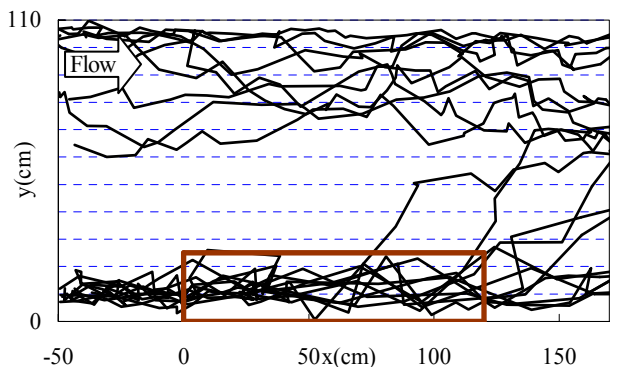


図-17 円柱群内に進入する匹数の割合



(a) $\gamma=0.75$, $z_0=10$ (円柱群内部へ60%進入)



(b) $\gamma=0.75$, $z_0=100$ (円柱群内部へ70%進入)

図-18 挙動軌跡図 (Run9)

期値 z_0 の変更結果を γ の変化と共に載せている。 z_0 の相違により円柱群内へと入る匹数に若干の差が見られた。そこで、この初期値 z_0 の違いが解析結果にどのような影響を与えるのかを見たのが図-18(a), (b)である。図より、初期値の違いによる挙動の違いは大きくないことがわかる。また、今回の計算した挙動軌跡と実験の遊泳軌跡(図-12)を比較すると、円柱群に進入した匹数に着目した場合、初期値 $z_0=100$ で70%進入となり良好にウグイの挙動を再現できたといえる。

5. まとめ

1) 間伐材を用いた杭水制が、実施例から見て魚の生息に適していることが判った。このことは、実魚を用いた

模型実験でも同様の結果を得た。

2) 現地観測および模型実験から、杭水制が流速低減させることが判った。

3) 二次元浅水方程式で杭水制がある場の流れを概ね再現できることが判った。ただし、杭間隔が狭くなると、計算値と実験値間での整合性が落ちてくるので、透過係数 K 、抵抗係数 C_D の更なる検討が必要である。

4) ランダムウォークモデルに魚の特性を入れることによって、流水中の魚の挙動を的確に表わすことが出来た。

5) 実魚を用いるときの流れの相似性との関係に不明な点が多いが、整列のみではなく千鳥状の配列での模型実験や現地観測を行い、データを積み重ねて水制に対する魚の対応、挙動を明らかにしていきたい。更に、水質、照度、植生などを配慮して、より精度の高いシミュレーションモデルを構築していく予定である。

謝辞：砂鉄川の現地調査に当っては、国土交通省東北地方整備局岩手河川国道事務所一関出張所の方々から御指導、助言を頂いた。記して謝意を表します。

参考文献

- (財)河川環境管理財団：河川砂防工事における木材活用工法ガイドブック(案)，山海堂，pp. 89, 2004
- 秋草 勲，吉川秀夫，坂上義太郎，芦田和男，土屋昭彦：水制に関する研究，土木研究所報告，第107の6，pp. 2, 1960
- 国土交通省東北地方整備局：平成18年度東北地方整備局管内技術研究発表会ホームページ，
<http://www.thr.mlit.go.jp/Bumon/B00097/k00360/happyoukai/H18/2bikoku/2-18.pdf>, 2006/8/15
- 山本晃一：護岸・水制の計画・設計 - 一歩先そして一歩手前 -，山海堂，pp. 238, 2003.
- 小池 篤：漁具に対する魚群行動の研究，恒星社厚生閣，pp. 120-121
- 中村俊六：魚道のはなし，山海堂，pp. 169-170, 1995
- 関谷 明，福井吉孝，下村 充，打田 剛：魚類の迷入とその防止法，土木学会論文集，No.782，pp. 81-91, 2005
- 石川雅朗：ウグイの挙動特性に関する実験的研究，河川技術論文集，第6巻，pp. 101-106, 2004
- 国土交通省中国地方整備局：岡山河川事務所ホームページ，
<http://www.okakawa-milt.go.jp/kouhou/kyougikai/kaitou2.pdf>, 2006/8/18
- (財)リバーフロント整備センター：河川における樹木管理の手引き，山海堂，pp. 107, 1999
- 下村 充，白川裕之，福井吉孝，関谷 明：迷入防止法の開発 - ランダムウォークによる魚の挙動解析とその応用 -：河川技術論文集，第8巻，pp. 337-342, 2002

(2006.9.30受付)